مطالعه و تحلیل عددی فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته‌ی سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان★

«یادداشت پژوهشی»

علی اخترپور[۱] عباس سروش[۲]

چکیده نقش اصلی هسته در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای کاهش و کنترل نشت آب از بدنه‌ی سد می‌باشد. برای دستیابی به این هدف عموماً از خاک‌های رسی برای هسته استفاده می‌شود که به‌خاطر نفوذپذیری اندک، این نوع خاک می‌تواند این وظیفه را به‌خوبی انجام دهد. ولی نفوذپذیری اندک این نوع خاک همزمان با بالا رفتن درجه‌ی اشباع خاک ناشی از افزایش سربار می‌تواند باعث ایجاد فشار آب حفره‌ای در هسته‌ی سد در زمان ساخت گردد و این فشارهای آب منفذی نمی‌تواند به‌سادگی استهلاک یابد. لذا افزایش سرعت خاکریزی می‌تواند باعث افزایش فشارهای آب منفذی در هسته به میزان قابل توجهی گردد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS7.2 و مدل رفتاری پلاستیک سخت‌شونده مقادیر فشار آب حفره‌ای و تنش‌های کل در هسته‌ی سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان در زمان ساخت و اولین آبگیری محاسبه می‌شود و با مقادیر حاصل از ابزار دقیق مقایسه می‌گردد. به‌طور کلی نتایج تحلیل تطبیق خوبی را با مقادیر حاصل از ابزار دقیق نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی سد سنگریزه‌ای، فشار آب حفره‌ای، مدل رفتاری الاستوپلاستیک، ضریب فشار آب حفره‌ای، تنش کل.

Numerical Stady of Pore Pressure Development and Dissipation in Core of Masjed-Soleyman Rockfill Dam

A. Akhtarpour A. Soroush

Abstract *The main role ofcore in earth dams is to reduce and control the seepage flow through the dam. In order to achieve this purpose, the core material is usually selected from pure or mixed clays.Due to very small coefficient of permeability, the clay cores can prevent water leakageeasily. However, pore water pressures developed inside the core during construction, can not be dissipated quickly. As a result, increasing the rate of embankment filling during the construction stage, may lead to large development of the pore pressure inside the core. In this study,based on a hardening elasto-plastic constitutive model, the total stresses and pore pressures inside the core of MASJED-E-SOLEYMAN rockfill dam, are calculated using the PLAXIS software during the construction and first reservoir filling stages.The analysis is in term of effective stress coupled with consolidation analysis. In order to verify the result of the numerical analysis, the measurment data from installed instruments intherockfill dam have been compared with the numerical results.This comparsion shows that the numerical analysis results are in a good agreement with the instrument results. Excess amount of pore pressures in the core of this dam is due to very small coefficient of permeability and high rate of embankment filling.*

Keywords Rockfill Dam, Pore Water Pressure, Elasto-Plastic Constitutive Model, Pore Pressure ratio, Total Stress, Effective Stress

★تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۵/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، دکترای عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد.

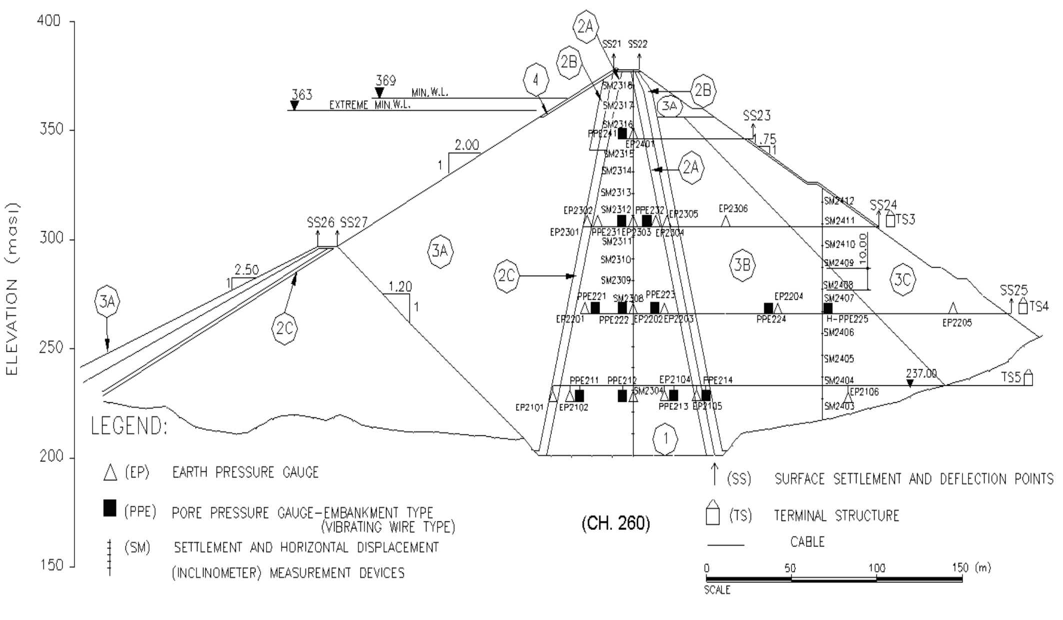
(۲) دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

مقدمه

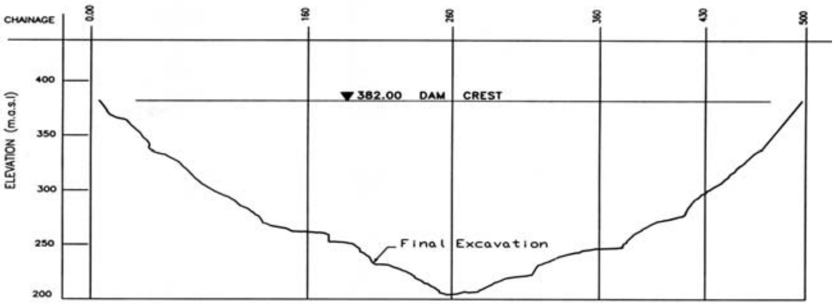
از موارد مهم در رفتارنگاری و کنترل پایداری سدهای خاکی و سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی، توجه به نحوه‌ی توسعه و میرایی فشار آب منفذی در هسته‌ی سد می‌باشد. افزایش بیش از حد فشار آب منفذی در هسته سبب کاهش تنش مؤثر می‌گردد و این پدیده پایداری سد را کاهش خواهد داد و نیز سبب افزایش نشست‌های درازمدت در هسته‌ی سد می‌گردد. با توجه به اهمیت فرضیات تحلیل در نتایج حاصل، خصوصاً پارامترهای مصالح، در ابتدا به تشریح فرضیات تحلیل و روش تعیین پارامترها می‌پردازیم. در ادامه، تحلیل صورت پذیرفته و نتایج به‌دست آمده از آن با نتایج ابزار دقیق مقایسه می‌شود و رفتار سد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

سد مسجد سلیمان

سد مسجد سلیمان از نوع سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی قائم می‌باشد. این سد، که هدف عمده از ساخت آن تولید انرژی است، در بین سال‌های ۱۳۷٤ تا ۱۳۷۹ بر روی رودخانه کارون بنا شده است. مرتفع‌ترین مقطع عرضی و مقطع طولی محور سد در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. هم‌چنین بر روی مقطع طولی سد، مقاطع ابزارگذاری شده ۱۶۰، ۲۶۰، ۳۶۰ و ٤۳۵ نشان داده شده است. مشخصات کلی و مشخصات مصالح سد در جدول (۱) به‌صورت خلاصه ارائه گردیده است. آبگیری سد در اواخر آذر ۱۳۷۹ (۱۹ دسامبر ۲۰۰۰) یک ماه پس از پایان ساخت، آغاز گردید. برای این‌که فرصت کافی برای کنترل ایمنی سد از طریق پایش و قراءت ابزاردقیق وجود داشته باشد، آبگیری در پنج مرحله صورت گرفت و کل مراحل آبگیری ۷ ماه به طول انجامید. از جمله نکاتی که در زمان ساخت و آبگیری سد مورد توجه واقع شد مقدار قابل توجه فشار آب حفره‌ای در هسته و نرخ نسبتاً کم استهلاک آن با گذشت زمان بود.



شکل ۱ مرتفع‌ترین مقطع عرضی سد مسجد سلیمان و موقعیت ابزار دقیق (مقطع ۲۶۰)



شکل ۲ مقطع طولی محور سد مسجد سلیمان و موقعیت مقاطع عرضی

جدول ۱ مشخصات هندسه و مصالح سد مسجد سلیمان

هندسه سد	مصالح سد	مصالح پی
حداکثر ارتفاع از پی ۱۷۸متر	مصالح هسته خاک رسی متشکل از ۸۰٪ CL و۲۰٪ GC	نوع مصالح
طول تاج ۴۸۰ متر	رطوبت متوسط تراکم هسته ۲٪ + Wopt	لایه‌های متناوب کنگلومرا،
نسبت طول تاج به حداکثر ارتفاع ۲/۷	پوسته (3A,3C,3B,3D) مصالح سنگریزه‌ای از	رس سنگ، ماسه
حجم بدنه ۲۲۸× ۱۰۶ m3	منابع کنگلومرا، ماسه سنگ و رس سنگ از پی و	سنگ و لای سنگ
	تونل‌های انحراف- تراکم در حالت خشک	

مراحل مدل‌سازی و تحلیل

تحلیل عددی بدنه‌ی سد مسجد سلیمان همراه با پی آن به‌صورت تحلیل تنش مؤثر همراه با تحکیم و محاسبه‌ی فشارهای آب منفذی درون هسته صورت گرفت. در این تحلیل، برای هر یک از مقاطع ابزارگذاری شده‌ی سد (شکل (۲)) مراحل زیر تکرار گردید.

زمان ساخت

۱- محاسبه‌ی تنش‌های برجا در پی، قبل از ساخت سد.
۲- مدل‌سازی فرازبند ادغامی.
۳- مدل‌سازی ساخت سد اصلی به‌صورت لایه‌ای با ضخامت هر لایه معادل ۱۰ متر.

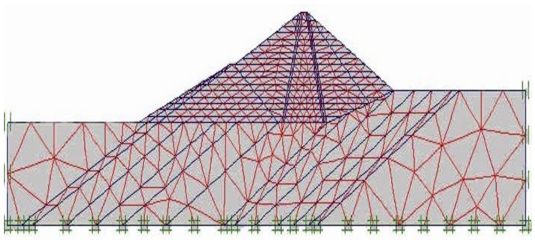
پس از ساخت هر لایه، تحلیل تحکیم برای لایه‌های زیرین انجام گردید. بدین صورت که تحلیل تنش-کرنش و تحکیم به‌صورت هم‌زمان صورت گرفت.

در تحلیل تحکیم از تئوری Biot استفاده شد که در آن تنش کل در جریان تحکیم الزاماً ثابت نمی‌باشد.

آبگیری

۱- تغییر خواص مصالح پوسته‌ی بالادست از خشک به اشباع (اعمال کاهش در E_{50}^{ref} وE_{oed}^{ref} و φ).
۲- استفاده از وزن مخصوص غوطه‌ور (γ') برای مصالح پوسته‌ی بالادست.
۳- اعمال بار هیدرواستاتیک به‌صورت فشار مرزی روی شیب بالادست هسته و روی پی بالادست.
۴- تحلیل تحکیم برای مدت ۶۰ روز صورت گرفت (نصف زمان آبگیری).

شکل(۳) نحوه‌ی شبکه‌بندی بلندترین مقطع سد (مقطع ۲۶۰) را نشان می‌دهد.



شکل ۳ شبکه‌بندی مقطع ۲۶۰ سد مسجد سلیمان (مقطع حداکثر)

مدل رفتاری مصالح

با توجه به نتایج آزمایش‌های متعدد انجام شده بر روی مصالح پی و مصالح قسمت‌های مختلف بدنه‌ی سد، برای مدل‌سازی پی از مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب و برای مصالح بدنه‌ی سد از مدل سخت‌شوندگی (Schanz et (Hardening Soil Model) al.,1998) که در نرم‌افزار Brinkgreve and PLAXIS) Vermeer,1998) وجود دارد، استفاده گردید.

مدل خاک سخت شونده

مدل فوق یک مدل الاستو- پلاستیک با ویژگی‌های زیر می‌باشد:

۱- سطح تسلیم بر اثر کرنش‌های پلاستیک می‌تواند بزرگتر شود (برعکس مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل که سطح تسلیم آن در فضای تنش‌ها ثابت است).

۲- دو نوع سخت شوندگی متمایز از یکدیگر در مدل تعریف شده است. سخت شوندگی برشی و سخت شوندگی فشاری.

۳- در حالت ویژه بارگذاری آزمایش سه محوری در شرایط زهکشی شده، رابطه‌ی بین تنش انحرافی و کرنش محوری به صورت هذلولی فرض می‌شود (Duncan and Chang,1970).

٤- مزایای مدل سخت شوندگی Hardening Soil Model نسبت به مدل هذلولی عبارتند از: تئوری پلاستیسیته در آن استفاده شده است؛ اتساع خاک در هنگام برش در آن در نظر گرفته شده است؛ یک کلاهک تسلیم(Yield Cap) در آن معرفی گردیده است.

مشخصه‌های اصلی مدل به قرار زیر است:

C': چسبندگی مؤثر.

ψ: زاویه‌ی اتساع.

φ': زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر.

E_{50}^{ref}: مدول سکانت در آزمایش سه محوری استاندارد در شرایط زهکشی شده.

E_{oed}^{ref}: مدول مماسی برای بارگذاری اولیه در دستگاه ادومتر.

m: عدد توان برای منظور کردن اثر سطح تنش بر روی سختی.

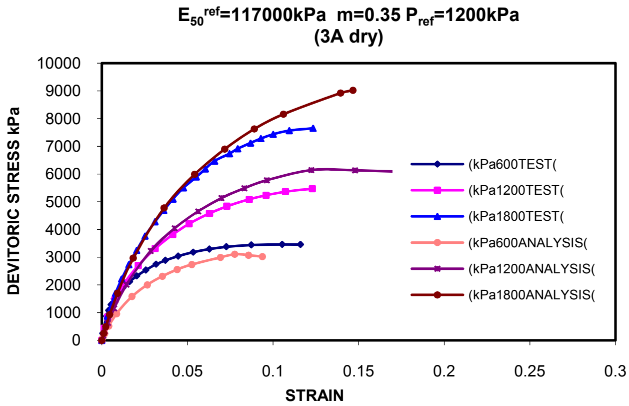
υ_{ur}: ضریب پواسون برای حالت بار برداری-بارگذاری مجدد (پیش فرض $\upsilon_{ur} = 0.2$).

P^{ref}: تنش مبنا برای سختی (پیش فرض P^{ref} =100 kN/m^2).

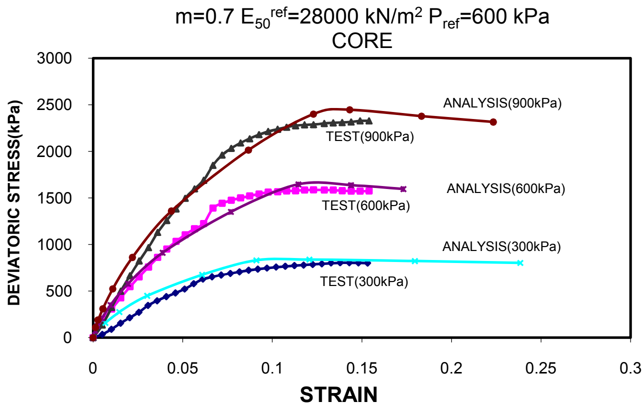
R_f: نسبت گسیختگی (پیش فرض R_f=0.9).

ارزیابی مدل و تدقیق پارامترها

برای ارزیابی دقیق روش عددی و نیز برای تدقیق پارامترهای ورودی مدل سخت‌شوندگی (به‌ویژه E_{50}^{ref} و m، که اثر قابل ملاحظه‌ای بر تغییرشکل‌های خاک دارند)، آزمایش‌های سه محوری انجام شده بر روی مصالح تشکیل دهنده‌ی بدنه‌ی سد، به‌وسیله‌ی تحلیل عددی مدل‌سازی گردید. با استفاده از تحلیل برگشتی، پارامترهای تغییر شکلی مصالح به‌گونه‌ای انتخاب شد که نتایج تنش-کرنش حاصل از تحلیل عددی بهترین تطابق را با نتایج متناظر حاصل از آزمایش‌های سه محوری داشته باشد. در این روش نمونه‌ی مورد آزمایش در شرایط تقارن محوری (Axisimetry) مدل عددی می‌شود و ابتدا فشار همه جانبه و سپس فشار محوری به مدل عددی اعمال می‌گردد. در روند اعمال بار محوری مقادیر کرنش قراءت شده و منحنی تنش انحرافی- کرنش محوری ترسیم و با مقادیر حاصل از آزمایش‌ها مقایسه می‌گردد. شکل (٤) نمونه‌ای از این نتایج را برای مصالح پوسته (3A) در آزمایش‌های سه محوری با سه فشار محصور کنندگی ٦۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. با توجه به این‌که تحلیل تنش مؤثر در شرایط زهکشی نشده و با در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای انجام شده است، از پارامترهای مؤثر هسته (C',E',φ') در تحلیل استفاده می‌گردد. لذا برای نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته‌ی زهکشی شده CD مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (٥) نتایج آزمایش‌های مصالح هسته و تطبیق حاصل از تحلیل عددی برای فشارهای محصورکنندگی ۳۰۰، ٦۰۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال قابل مشاهده است.



شکل ٤ تطبیق منحنی‌های حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های سه محوری (مصالح پوسته 3A در حالت خشک)



شکل ٥ تطبیق منحنی‌های حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های سه محوری (مصالح هسته در حالت CD)

مشاهده می‌شود که مدل سخت شوندگی به‌خوبی قادر به مدل‌سازی رفتار نمونه‌های مصالح در آزمایش‌های سه محوری بوده است. روند مدل‌سازی فوق برای سایر مصالح بدنه‌ی سد، تکرار گردید و نتایج مشابه به‌دست آمد. جدول (۲) خواص مصالح و پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح مختلف بدنه‌ی سد را نشان می‌دهد. خواص مصالح و پارامترهای پی در جدول (۳) خلاصه شده است.

با بررسی و مطالعه‌ی دقیق آزمایش‌های نفوذپذیری صورت گرفته بر روی مصالح هسته، ضریب نفوذپذیری افقی و قائم این مصالح به‌ترتیب K_h=۲/٥×۱۰$^{-۸}$cm/s و K_v=۱×۱۰$^{-۸}$cm/s تخمین زده شد.

نتایج تحلیل

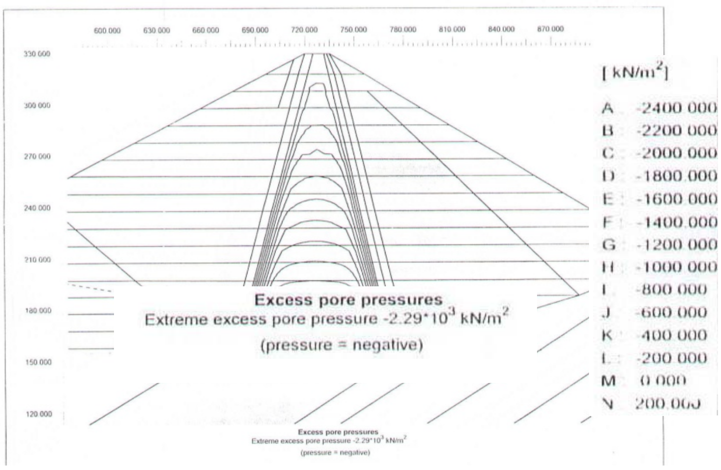
با توجه به این‌که هدف اصلی از انجام این پژوهش مطالعه‌ی توسعه و میرایی فشار آب منفذی در هسته بود، در اینجا صرفاً نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل قائم و نسبت فشار آب حفره ای R_u ارائه می‌گردد. شکل‌های (٦) و (۷) به‌عنوان نمونه، به‌ترتیب کانتورهای فشار آب حفره‌ای در هسته‌ی سد پس از پایان ساخت و پس از آبگیری برای مقطع ۲٦۰ را نشان می‌دهد. همچنین جدول‌های (٤) و (٥) به‌ترتیب فشارهای آب حفره‌ای و تنش‌های کل محاسبه شده را با مقادیر متناظر آن‌ها برای ابزارهای نصب شده در مقاطع مختلف مقایسه می‌کند.

جدول ۲ پارامترهای مصالح بدنه‌ی سد مسجد سلیمان

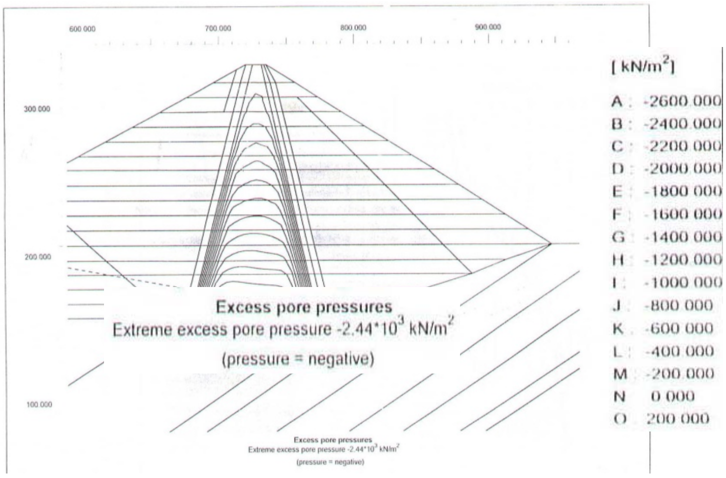
Material	Drainage Condition	γdry (kN/m^3)	γsat (kN/m^3)	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	E50ref (kPa)	Eoedref (kPa)	Eurref (kPa)	C’ (kPa)	φ'	ψ	υur	Pref (kPa)	m	Rf
2A فیلتر پایین دست	Drained	20.5	23.2	----	----	72000	102780	216000	0.0	35	5	0.2	1200	0.5	0.8
2B ناحیه انتقالی در پایین دست	Drained	18.3	19.7	----	----	72000	102780	216000	0.0	41	11	0.2	1200	0.5	0.8
2C ناحیه انتقالی در بالادست	Drained	22.9	23.2	----	----	126000	167000	378000	0.0	41	11	0.2	1200	0.5	0.7
core	Undrained	21.5	22.5	2.5*10-8	1*10-8	28000	33000	84000	25	30.9	0	0.2	600	0.7	0.7
shell(3A,3C)(dry)	Drained	22.6	23.5	----	----	117000	116771	351000	0.0	45	15	0.2	1200	0.35	0.8
shell(3A,3C)(saturated)	Drained	13.5	13.5	----	----	94000	90563	282000	0.0	45	15	0.2	1200	0.35	0.7
shell(3B)	Drained	22.9	23.9	----	----	95000	142234	285000	0.0	41.7	2	0.2	300	0.35	0.9
saturated2A	Drained	----	23.2	----	----	72000	102780	216000	0.0	35	5	0.2	1200	0.5	0.8
sturated2B	Drained	----	19.7	----	----	37000	65237.7	111000	0.0	41	11	0.2	600	0.5	0.7
sturated2C	Drained	----	23.2	----	----	126000	167000	378000	0.0	41	11	0.2	1200	0.5	0.7

جدول ۳ پارامترهای فرض شده برای مصالح پی سد

Material	Type	γdry (kN/m2)	γsat (kN/m2)	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	υ	E (kPa)	C (kPa)	φ	ψ
found1 (Conglomerate)	Drained	23	24	1*10-5	1*10-5	0.3	3872200	700	30	0
found2 (Siltstone)	Drained	24	25	1*10-3	1*10-3	0.3	6776400	2000	45	12



شکل ٦ کانتورهای فشار آب منفذی در انتهای ساخت در مقطع ۲٦۰



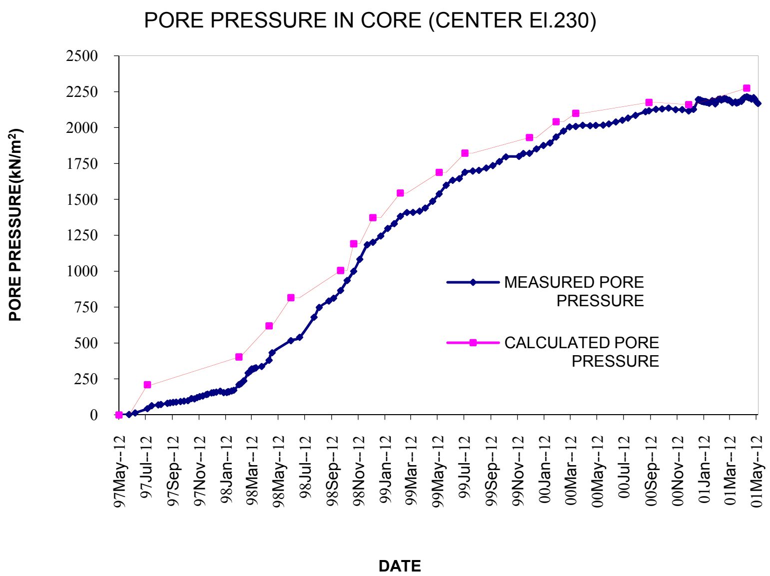
شکل ۷ کانتورهای فشار آب منفذی پس از اولین آبگیری در مقطع ۲٦۰

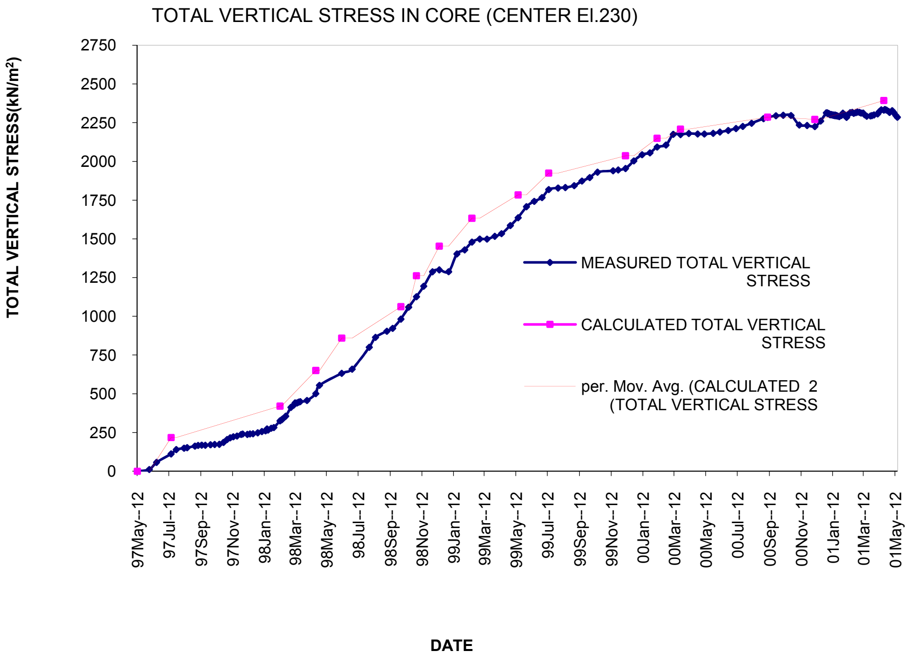
جدول ٤ مقایسه‌ی نتایج تحلیل با ابزار دقیق در زمان بلافاصله پس از ساخت

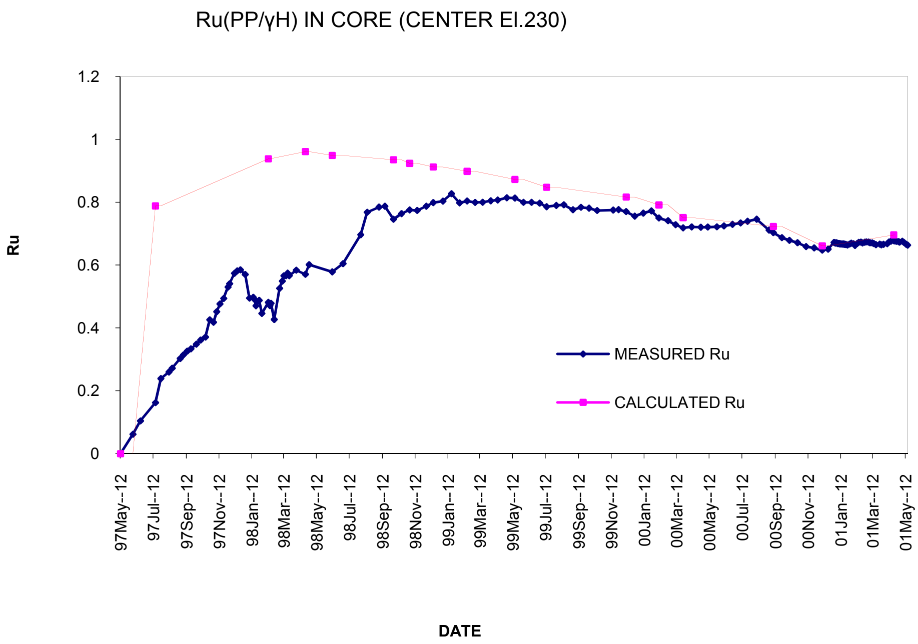
نتایج تحلیل عددی			نتایج ابزار دقیق			موقعیت			ابزار
ضریب فشار آب حفره‌ای Ru(PP/gH)	تنش کل (kPa)	فشار آب حفره ای (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای Ru(PP/gH)	تنش کل (kPa)	فشارآب حفره‌ای (kPa)	موقعیت نسبت به مرکز هسته	تراز نصب	مقطع نصب	
0.66	2271	2160	0.65	2225	2115	Centre	230	260	EP2103 و PPE212
0.63	1942	1902	0.69	2334	2096	30m / DS	230	260	EP2104 و PPE213
0.59	1546	1438	0.58	1455	1407	Centre	270	260	EP2202 و PPE222
0.60	1421	1361	0.62	1433	1412	19.5m / DS	270	260	EP2203 و PPE223
0.44	731	676	0.32	696	494	12.8m / DS	310	260	EP2304 و PPE232
0.65	1552	1445	0.6	1442	1329	Centre	278.9	160	EP1102 و PPE112
0.66	1435	1382	0.61	1369	1258	20m / DS	279	160	EP1103 و PPE113
0.58	971	898	0.36	917	552	11.9m / DS	310	160	EP1204 و PPE122
0.64	1515	1409	0.56	1343	1237	Centre	280.1	360	EP3102 و PPE312
0.64	1376	1337	0.59	1361	1212	19.5m / DS	280.2	360	EP3103 و PPE313
0.58	946	872	0.41	897	612	12.2m / DS	310.2	360	EP3204 و PPE322
0.63	1007	956	0.34	935	509	12.3m / DS	309.6	420	EP4104 و PPE412

جدول ۵ مقایسه‌ی نتایج تحلیل با ابزار دقیق بلافاصله پس از اولین آبگیری

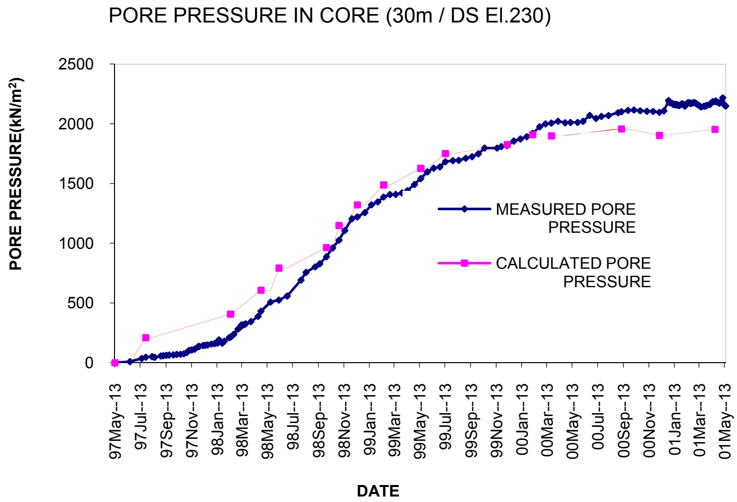
ابزار	موقعیت			نتایج ابزار دقیق			نتایج تحلیل عددی		
	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به مرکز هسته	فشارآب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای Ru(PP/gH)	فشار آب حفره‌ای (kPa)	تنش کل (kPa)	ضریب فشار آب حفره‌ای
EP2103 و PPE212	260	230	Centre	2214	2330	0.68	2275	2394	0.69
EP2104 و PPE213	260	230	30m / DS	2185	2375	0.72	1952	1992	0.64
EP2202 و PPE222	260	270	Centre	1523	1598	0.63	1562	1647	0.64
EP2203 و PPE223	260	270	19.5m / DS	1533	1581	0.67	1470	1529	0.64
EP2304 و PPE232	260	310	12.8m / DS	612	801	0.40	756	808	0.50
EP1102 و PPE112	160	278.9	Centre	1430	1573	0.64	1482	1585	0.66
EP1103 و PPE113	160	279	20m / DS	1380	1495	0.67	1395	1448	0.67
EP1204 و PPE122	160	310	11.9m / DS	655	938	0.43	939	996	0.61
EP3102 و PPE312	360	280.1	Centre	1339	1430	0.61	1467	1568	0.66
EP3103 و PPE313	360	280.2	19.5m / DS	1292	1436	0.63	1394	1432	0.67
EP3204 و PPE322	360	310.2	12.2m / DS	709	983	0.47	913	972	0.61
EP4104 و PPE412	420	309.6	12.3m / DS	550	968	0.36	981	1027	0.65

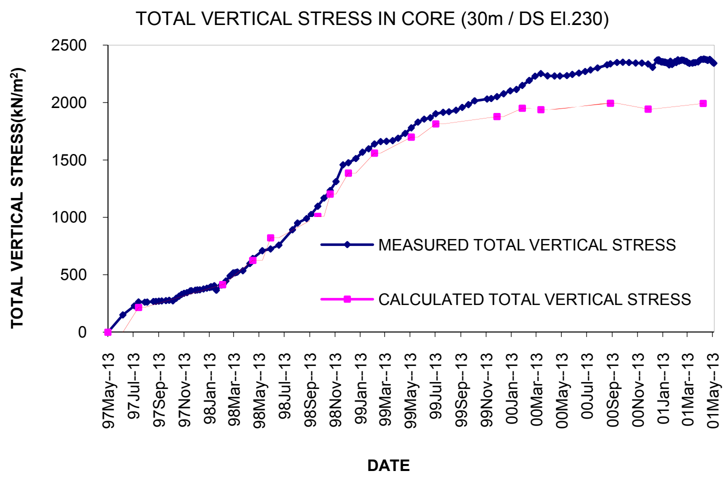


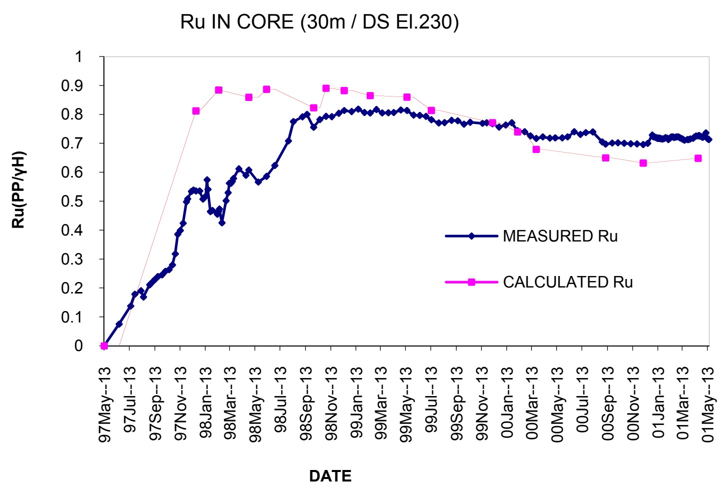




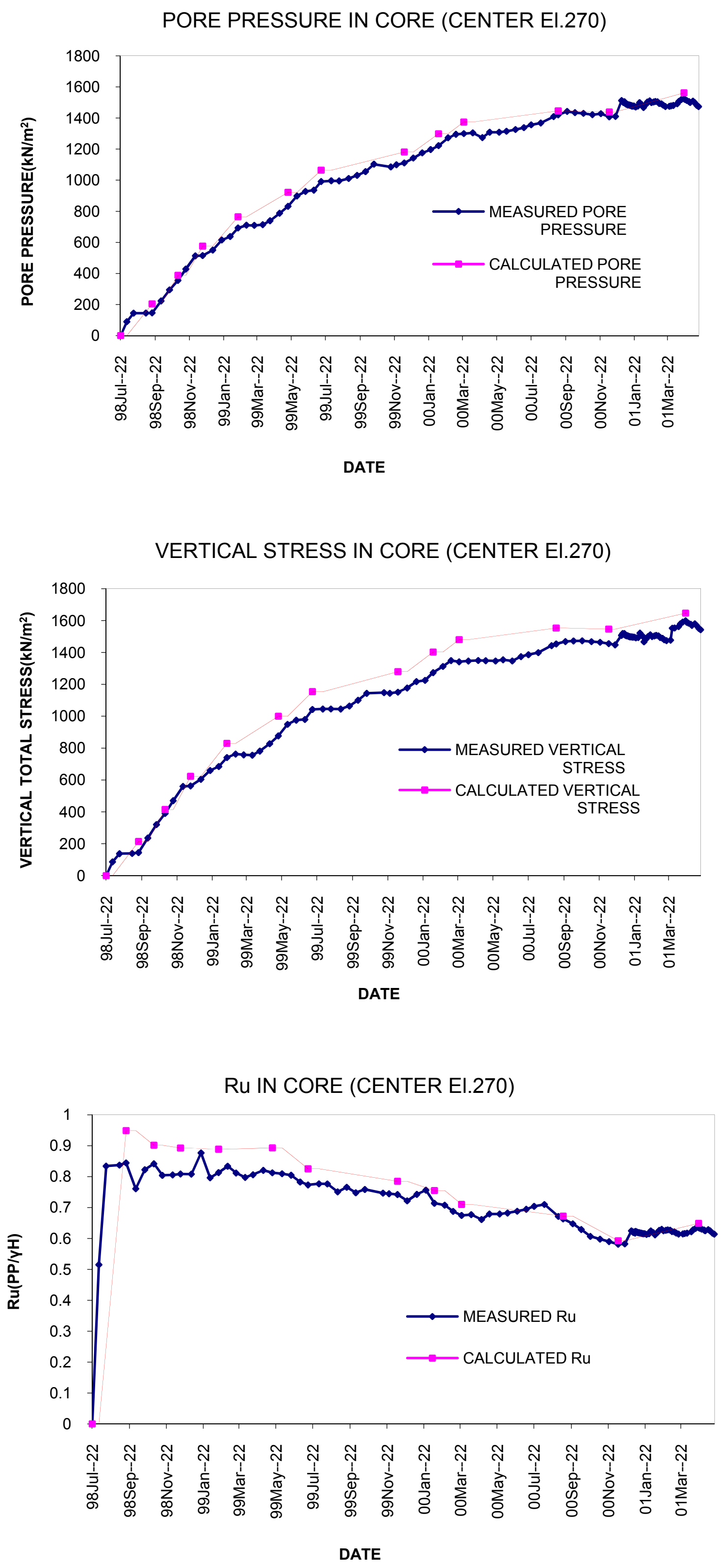
شکل ۸ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار EP212 و PPE2103 (مقطع ۲۶۰)



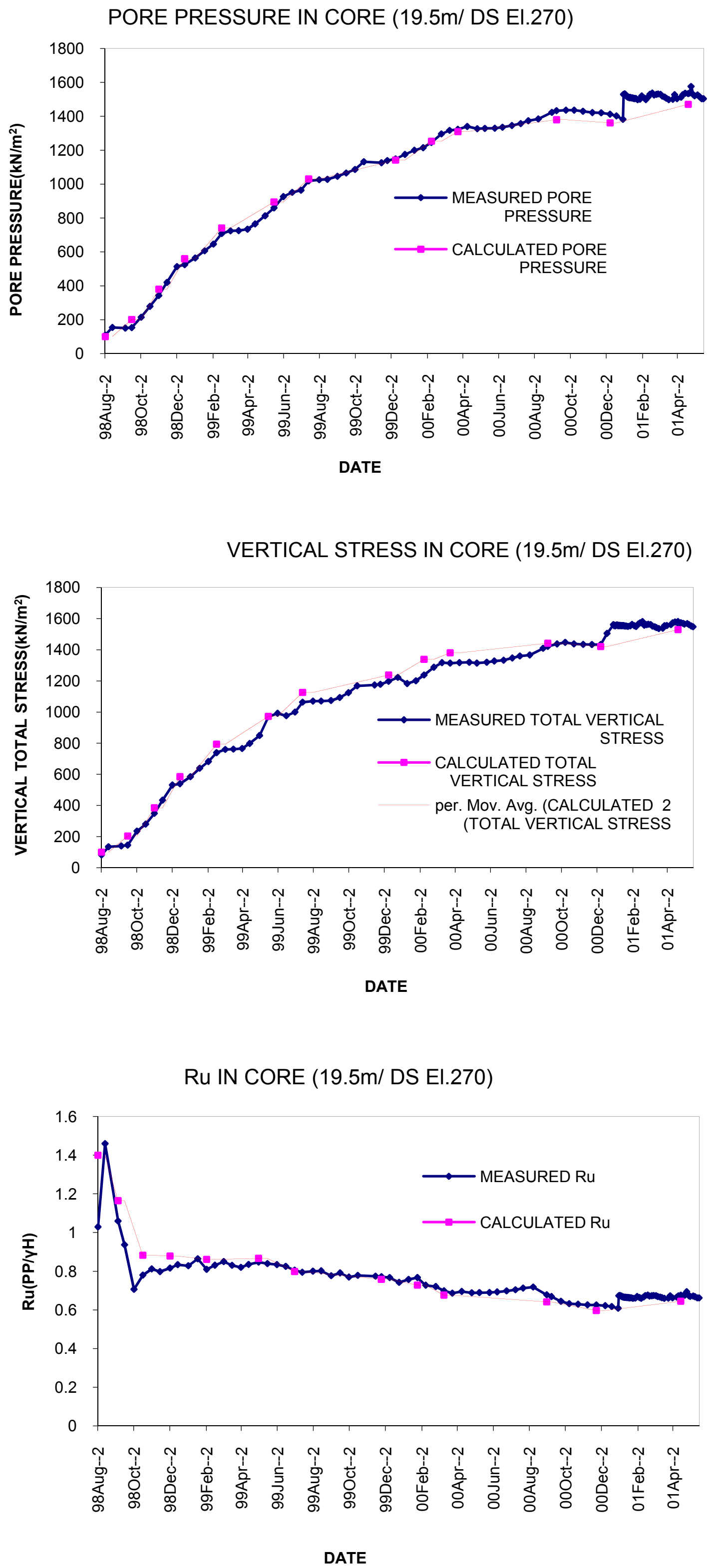




شکل ۹ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار EP2104 و PPE213 (مقطع ۲۶۰)



شکل ۱۰ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار EP2202 و PPE222 (مقطع ۲۶۰)



شکل ۱۱ نتایج فشار آب حفره‌ای، تنش کل و ضریب فشار آب حفره‌ای Ru حاصل از تحلیل و ابزار دقیق در ابزار EP2203 و PPE223 (مقطع ۲۶۰)

در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نتایج تنش کل ، فشار آب منفذی و نسبت فشار آب منفذی Ru (نسبت فشار آب به وزن سربار γh)حاصل از تحلیل عددی و مقایسه‌ی آن با نتایج ابزار دقیق برای مقطع ۲٦۰ آورده شده است.

γh/ محاسبه شده Ru = u محاسبه شده

γh/ اندازه گیری شده Ru = u اندازه گیری شده

تحلیل نتایج مدل‌سازی عددی

همان‌گونه که در شکل‌های (۸) تا (۱۱) ملاحظه می‌گردد، در زمان‌های اولیه‌ی خاکریزی به‌دلیل کم بودن سربار هنوز خاک کاملاً اشباع نمی‌باشد و لذا مقادیر اندازه‌گیری‌شده فشار آب حفره‌ای کمتر از مقادیر محاسبه شده می‌باشد. دلیل دیگر این اختلاف این است که احتمالاً در لحظات اولیه‌ی خاکریزی فشار آب منفذی ایجاد شده به‌علت نفوذپذیری پایین مصالح کاملاً به ابزار منتقل نشده و برای این‌که ابزار اندازه-گیری کاملاً اشباع شود و تحت فشار کامل آب قرار گیرد، نیاز به گذشت زمان بوده است. پس از افزایش تراز خاکریزی، خاک کاملاً اشباع شده و لذا تطبیق بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده بسیار خوب می‌باشد. به‌طوری که در زمان بلافاصله پس از اتمام ساخت اختلاف بین نتایج تحلیل عددی و ابزار دقیق ناچیز است. در تراز ۲۷۰ که ابزارهای PPE223 و PPE222 نصب شده است، حتی در لحظات اولیه تطبیق خوبی بین نتایج تحلیل عددی و مشاهدات ابزار دقیق وجود دارد که به‌علت رطوبت بالای هسته در این تراز می‌باشد (احتمالاً به‌دلیل بارندگی).

آبگیری اولیه سبب افزایش تنش‌های کل و به‌دنبال آن فشارهای آب منفذی در هسته گردیده است؛ زیرا اولاً نیروی هیدرواستاتیکی آب بر وجه بالادست هسته اعمال می‌گردد و ثانیاً رُمبش اشباعی در پوسته‌ی بالادست سبب کاهش قوس‌زدگی و در نتیجه افزایش تنش کل در هسته می‌گردد. افزایش فشار آب منفذی ناشی از آبگیری نسبتاً کم بوده است.

به هر حال مقادیر فشار آب منفذی در زمان انتهای ساخت و اولین آبگیری بیش از مقادیر مشاهده شده در سدهای دیگر بوده است. علت وقوع این پدیده را می‌توان سرعت نسبتاً زیاد اجرای خاکریز بدنه‌ی سد و نفوذپذیری اندک مصالح هسته دانست.

از موارد دیگری که در این سد مشاهده شده است این است که مقادیر فشار آب حفره‌ای در مرکز هسته و در پایین دست هسته بسیار به یکدیگر نزدیک است. در حالی که انتظار می‌رود با توجه به مجاورت با فیلتر، در پایین دست هسته مقادیر کمتری برای فشار آب حفره‌ای داشته باشیم. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که نفوذپذیری افقی مصالح هسته کمتر از مقادیر مفروض اولیه می‌باشد. تحلیل‌های متعدد با نسبت‌های مختلف نفوذپذیری افقی به قائم (K_h/K_v) نشان می‌دهد که بهترین تطبیق با فرض نفوذپذیری افقی ۲/۵ برابر نفوذپذیری قائم حاصل می‌شود. همچنین با پیشرفت روند تحکیم در مجاورت فیلتر تنش مؤثر افزایش یافته و نفوذپذیری در این منطقه کاهش بیشتری خواهد داشت. این کاهش نفوذپذیری از استهلاک فشار آب منفذی در نواحی مجاور جلوگیری می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل عددی تطبیق خوبی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در همه‌ی ابزارهای اندازه‌گیری تنش و فشار آب حفره‌ای نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت که مقدار ضریب فشار آب حفره‌ای در زمان ساخت سد در محدوده‌ی قابل قبول به‌نظر می‌رسد، اما مقدار فشار آب منفذی در پایان ساخت بیش از مقادیر معمول مشاهده شده در سایر سدها می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی آن است که روند تحکیم مصالح به‌کندی صورت پذیرفته است. دلایل ماندگاری آب منفذی در

هسته‌ی سد مسجد سلیمان و در نتیجه بالابودن فشار آب منفذی به شرح زیر است:

۱- هسته نسبتاً عریض است.

۲- درصد رطوبت در سمت تر درصد رطوبت بهینه است و بر اساس گزارش‌های کنترل کیفیت به‌طور متوسط حدود ۱/۵٪ بیش از رطوبت بهینه می‌باشد. معمولاً حداقل نفوذپذیری در رطوبت ۲-٤٪ بیش از بهینه حاصل می‌گردد.

۳- مصالح هسته ریزدانه است و در گروه CL قرار می‌گیرد. هم‌چنین دامنه‌ی خمیری متوسط مصالح هسته در حدود ۱۹٪ می باشد، بنابراین دارای نفوذپذیری نسبتاً کمی بوده است.

٤- از غلطک پاچه‌بزی به‌منظور تراکم هسته استفاده شده است. می‌دانیم که خاک‌های رسی متراکم شده با غلطک پاچه‌بزی در یک درصد تراکم مشخص، نسبت به رس‌های متراکم شده با غلطک چرخ لاستیکی دارای نفوذپذیری کمتری است .

۵- مطابق تئوری ساختار کلوخه‌ای خاک‌های رسی متراکم شده (Olsen 1962) عمده جریان در رس‌های متراکم شده از فضاهای بین کلوخه‌های خاک عبور می‌کند و خاکی که دارای کلوخه‌های با ابعاد کوچکتری باشد، نفوذپذیری کمتری خواهد داشت .

مراجع

۱. اخترپور، علی ، "تأثیر درصد رطوبت زمان تراکم بر نفوذپذیری رس‌های متراکم شده"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مهرماه، (۱۳۸۱).

۲. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران ،"گزارش رفتار سد مسجد سلیمان در حین ساختمان و اولین آبگیری تا اردیبهشت۱۳۸۰"، ، خرداد، (۱۳۸۰).

3. Charles, J.A. , "The Use of One-Dimensional Compression Tests and Elastic Theory in Predicting Deformations of Rockfill Embankments", *Canadian Geotechnical Journal*, 13, pp.189-200, (1976).

4. Eisenstein, Z. and SIMMONS, J.V., "Three-Dimensional Analysis of Mica Dam, Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams", Proc. Of Int. Symp. At Univ. of Wales, Swansea, pp.431-545, Sept.,(1975).

5. Eisenstein, Z. and Law, S.T.C., "Analysis of Consolidation Behavior of Mica Dam", *J.Soil Mech.* Fdn. Eng. Div. , ASCE, 103, NoGT8, pp.879-895, (1977).

6. Iran Water & Power Resources Development Co. Godar-E-Landar Hepp,Review on Additional Laboratory Test, May, (1996).

7. James, M., Duncan and Chin-Yung Chang, members ASCE,"Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils",*J. Soil Mechanics and Fondation Engineering,*Vol.96, No.SM5, ,P. 1622-1651 September, (1970).

8. Schanz, T. , Vermeer, P.A. , Bonnier, P.G., "Formulation and Verification of the Hardening-Soil Model", *Submitted for Publication to Int. J. Numer.* Anal. Meth. Geomech , (1999).

9. Icold , "Static Analysis of Embankment Dams" , Bulletin, No.53, (1986).

10. Naylor. D. J., "Stress-Strain Laws for Soil", Chapter 2 of Developments in Soil Mechanics, Ed.C.R. Scott, Applied Science, England, (1978).